

На правах рукописи

ТЛЕУГАБУЛОВ Борис Сулейманович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ  
ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДОБАВОК

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург  
2010

Научный руководитель:

Доктор технических наук  
Загайнов Сергей Александрович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук  
Кашин Виктор Васильевич

Кандидат технических наук  
Матюхин Владимир Ильич

Ведущая организация:

ОАО «Уралмеханобр»

Защита состоится «26» марта 2010 г. в 15 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.285.05 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет – УПИ им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» в ауд. I (зал Ученого Совета) главного корпуса по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УГТУ-УПИ, ученому секретарю совета.  
Факс (343) 3743884.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

С. В. Карелов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** На эффективность доменной плавки большое влияние оказывают параметры шлакового режима. Уменьшение вязкости конечного шлака позволяет снизить потери чугуна, что является эффективным способом энерго и - ресурсосбережения. Улучшение шлакового режима достигается путем изменения состава пустой породы доменной шихты. Ввод флюсующих добавок на стадии агломерации позволяет обеспечить равномерное распределение свойств доменной шихты по всему сечению печи. Поэтому изучение влияния флюсующих добавок на качество агломерата и разработка технологии, позволяющей получать продукт высокого качества, а так же анализ работы доменных печей при использовании подобных добавок, изменяющих свойства шлака, является актуальной задачей.

**Цель работы.** Основная цель диссертационного исследования состояла в поиске путей улучшения шлакового режима при выплавке чугуна из руд Уральского региона.

Достижение поставленной цели потребовало:

- анализа особенностей доменной плавки магнетитовых руд Тагило-Кушвинского месторождения и качканарских титаномагнетитов;
- лабораторных исследований влияния магнийсодержащих добавок на качество агломерата;
- разработки рекомендаций по использованию магнезиальных добавок в доменной плавке магнетитовых руд Тагило-Кушвинского месторождения;
- разработки рекомендаций по использованию борсодержащих и марганецсодержащих добавок при выплавке ванадиевого чугуна из качканарских титаномагнетитов;
- проведения промышленных исследований и разработки рекомендаций по технологии выплавки чугунов.

**Научная новизна** диссертации заключается в следующем:

1. На основе экспериментальных исследований получены новые данные о влиянии магнийсодержащих и борсодержащих добавок на качество агломератов и изменение свойств доменных шлаков, которые дают

возможность реализации гибких технологических режимов производства агломерата и выплавки чугуна при многокомпонентных шихтах.

2. Впервые экспериментально установлено и научно объяснено влияние  $MnO$  на процессы разрушения карбидов титана при плавке титаномagnetитов. Выведена зависимость требуемого расхода марганецсодержащей добавки от количества титана, находящегося в виде карбидов и карбонитридов.

3. Развиты представления о механизме восстановления кремния применительно к условиям доменного процесса и уточнена взаимосвязь между давлением и содержанием кремния в чугуне при плавке ванадийсодержащих титаномagnetитов.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.** Разработанная технология производства железорудного агломерата с добавкой в шихту дунита периодически применяется на Высокогорском ГОК. Показано, что ввод в шихту борсодержащих материалов является эффективным мероприятием для совершенствования шлакового режима при плавке сырья с повышенным содержанием титана. Запатентованы и внедрены способы доменной плавки титансодержащего железорудного сырья с добавкой в шихту марганецсодержащих добавок. Разработан способ доменной плавки, по которому минимизация восстановления титана достигается за счет снижения содержания кремния в чугуне до минимально возможного уровня, определяемого в зависимости от давления газов в горне печи.

**Достоверность полученных результатов** основывается на использовании современных методик исследования и подтверждена опытно-промышленными испытаниями и работой доменных печей.

**Апробация работы.** Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на международной научно-технической конференции «Уральская металлургия на рубеже тысячелетий» (г. Челябинск, 1999 г.), на I международной научно-практической конференции «ИНТЕХМЕТ-2008» (г. Санкт-Петербург, 2008 г.), на международной научно-практической конференции «Творческое наследие Б.И. Китаева» (г. Екатеринбург, 2009), на Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы повышения качества металлопродукции по

основным переделам черной металлургии» (г. Днепропетровск, 1989 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы теории и технологии подготовки железорудного сырья для доменного процесса и бескоксовой металлургии» (г. Днепропетровск, 1990 г.), на шестом всесоюзном совещании по химии, технологии и применению ванадиевых соединений (г.Н. Тагил-г.Свердловск, 1990 г.), на Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Интенсификация металлургических процессов и повышение качества металлов и сплавов» (г. Тула, 1990 г.), на региональной научно-технической конференции «Наука – Образование – Производство»: Опыт и перспективы развития» (г. Нижний Тагил, 2009 г.).

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 24 печатных работах, в том числе в 7 патентах.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 192 наименований; изложена на 162 стр. машинописного текста, включая 38 рисунков и 26 таблиц.

**На защиту выносятся:**

- результаты исследований влияния магнийсодержащих добавок на качество агломератов и шлаковый режим при выплавке передельных чугунов из магнетитовых руд Тагило-Кушвинского месторождения;
- результаты исследований влияния борсодержащих и марганцевых добавок на показатели выплавки ванадиевого чугуна из качканарских титаномагнетитов, а также технические решения по их использованию;
- практические результаты рекомендованного технологического режима выплавки ванадиевого чугуна на реконструированных доменных печах НТМК.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дана краткая характеристика современного состояния доменного производства, обоснована актуальность и сформулирована цель диссертационной работы.

**В первой главе** представлен аналитический обзор исследований по влиянию свойств шлака на ход процессов доменной плавки и особенностей

поведения оксидных (шлаковых) расплавов в аглодоменном переделе. Общеизвестно, что на эффективность доменной плавки большое, подчас определяющее, влияние имеет шлаковый режим, который может быть улучшен введением специальных добавок. Влияние добавок на ход процессов доменной плавки особенно эффективно, когда они вносятся в доменную печь с агломератом, что позволяет добиться, равномерного по сечению печи, протекания процессов шлакообразования.

В технологии окискования железорудного сырья и выплавке передельного чугуна широкое распространение получили магнийсодержащие добавки. Но оптимальное содержание  $MgO$  в доменном шлаке зависит от конкретных условий ведения процесса, а природа (генезис) магнийсодержащих добавок различным образом влияет на показатели агломерационного и доменного процессов и это влияние можно установить только экспериментальным путем.

Эффективность доменной плавки титансодержащего сырья определяется развитием процессов образования тугоплавких соединений титана (карбидов и карбонитридов), которые повышают кажущуюся вязкость шлаков. Снижение вязкости шлака в доменной плавке титаномagnetитов можно достичь применением шлакоразжижающих добавок. Оптимальный расход этих добавок определяется конкретными условиями плавки.

Системное исследование влияния добавок на агломерационный и доменный процесс является предпосылкой для совершенствования шлакового режима доменной плавки и разработки технологических режимов ведения процессов.

**Во второй главе** изложена методика проведения исследований. Концепция исследований схематично отражена на рис. 1.

Методика проведения исследований заключалась:

- в анализе технологических параметров работы аглофабрик и доменных печей НТМК;
- в определении показателей процесса спекания в лабораторных условиях при обеспечении технологических параметров (разрежение, температура шихты и т.д.), характеризующих работу агломашин;

- в исследовании металлургических свойств агломератов (холодная прочность по ГОСТ 15137 – 77, пористость агломератов по ГОСТ 25732 – 88, восстановимость и размягчаемость агломератов (по методикам МИСиС), прочность агломератов в процессе восстановительно-тепловой обработки по ГОСТ 27446 – 87);
- в исследовании свойств шлаковых расплавов, а именно определение фильтруемости их через коксовую насадку и вязкости;
- в обработке данных опытно-промышленных испытаний.

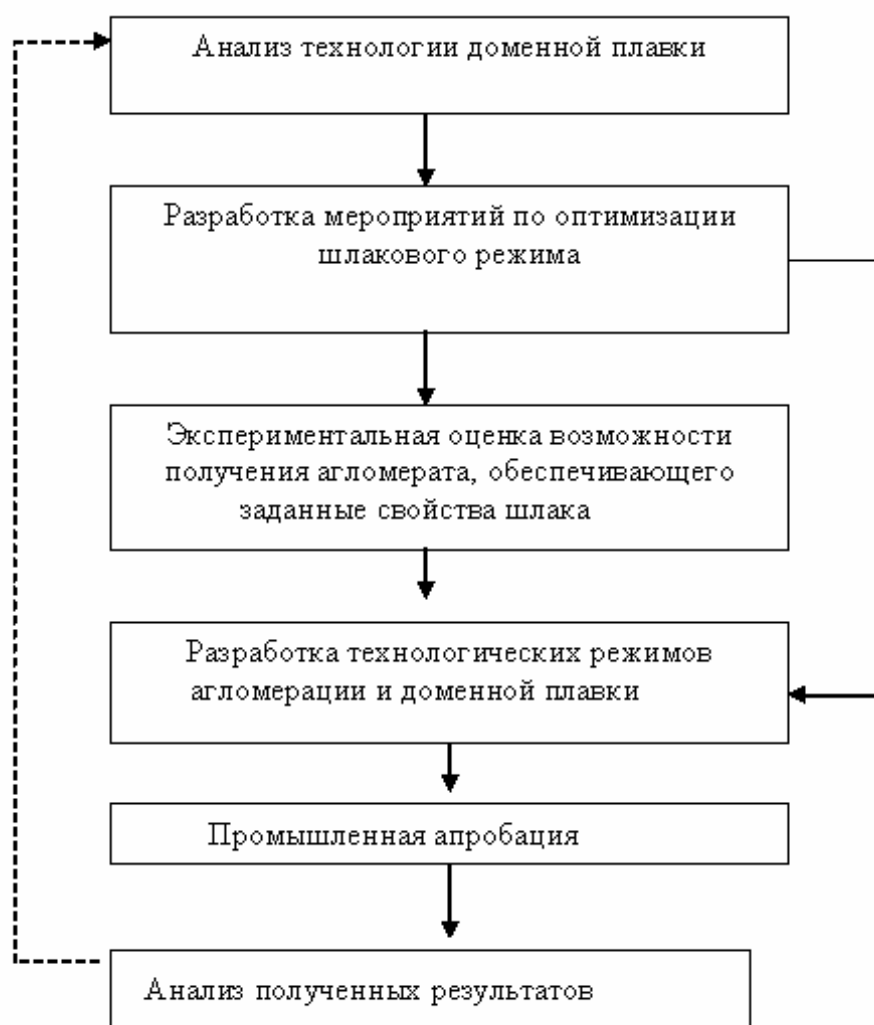


Рис. 1. Концепция сквозных исследований

**В третьей главе** приведены результаты исследований по влиянию различных видов магниезиальных добавок на агломерационный и доменный процесс при переработке руд Тагило-Кушвинского месторождения.

Первоначально была изучена вязкость реальных доменных шлаков НТМК и влияние на ее изменение добавок MgO. Установлено, что наиболее эффективное

снижение вязкости происходит при повышении концентрации магнезии от 4,1 до 6,5 % (рис. 2): вязкость снижается при 1500 °С на 0,08 Па·с, при 1400 °С на 0,16 Па·с и при 1300 °С на 0,49 Па·с. С дальнейшим повышением концентрации MgO до 9,9 % вязкость снижается не более чем на 0,04 Па·с при увеличении температуры кристаллизации шлаков на 35 °С. Попутно установлено, что введение в шлак (с 6,1 % MgO) оксида стронция в количестве до 2 % не оказывает существенного влияния на вязкость расплава.

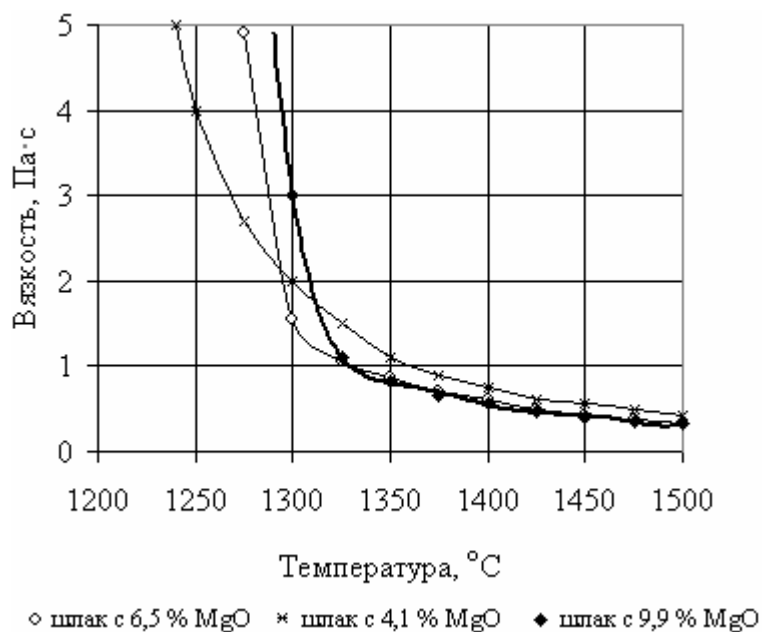


Рис. 2. Вязкость доменных шлаков с различным содержанием магнезии

Следует отметить, что промышленные опыты по введению магнезиальных добавок (сырой доломит, сырой и обожженный сидерит, сырой и обожженный дунит) непосредственно в доменную шихту, как минимум, не улучшали показателей плавки, что связано как с дополнительными затратами тепла и времени на разложение карбонатов, гидратов и формирование шлака, так и с ухудшением однородности шихты из-за локального размещения в ней добавок. Поэтому магнезиальные добавки не просто желательно, а необходимо вносить в доменную печь в составе агломерата.

В предварительных исследованиях дана сравнительная оценка эффективности сквозного воздействия на показатели аглодоменного производства необходимого количества добавок доломита, сидерита, стронцийсодержащего доломита, дунита, бишофита и карналлита. Особо следует отметить опыты по использованию магниихлорсодержащих добавок, а



также впервые проведенные промышленные испытания по введению в аглошихту стронцийсодержащего доломита, доказавшие возможность его использования для улучшения шлакового режима доменной плавки.

Стронцийсодержащий доломит (в виде хвостов обогащения целестиновой руды) 5-ти %-ной влажности имел крупность менее 1,25 мм и содержал, %: CaO – 31,8; MgO – 14,2; SrO – 5,2; SiO<sub>2</sub> – 1,6; S – 2,7; п.п.п. – 38,7. Введение в шихту данной добавки (при среднем расходе 37,9 кг/т агломерата) снизило расход твердого топлива на 4 кг/т агломерата при сохранении прочности агломерата. Проплавка опытного агломерата (на доменной печи объемом 2700 м<sup>3</sup> при доле его в железорудной части шихты – 59,4 %) способствовала снижению вязкости шлака (на 0,08 Па·с) и потерь с ним металла (с 2,0 до 1,2 %), уменьшению содержания серы в чугуне с 0,020 до 0,019 % и экономии кокса на 0,9 кг/т чугуна.

В качестве магнийхлорсодержащих добавок были использованы бишофит (MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) и карналлит (KCl·MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O). Данные соединения водорастворимы и при их подаче в поток шихты равномерно распределяются в его объеме. Обработка железной руды или концентрата рассолом таких добавок в зимнее время обеспечивает снижение смерзаемости материала, облегчение условий транспортировки и выгрузки.

Лабораторными спеканиями с бишофитом было установлено, что добавка его в пределах 1 % к обычной шихте лебяжинской аглофабрики повышает механическую прочность агломерата на 3 %. Промышленная апробация использования 0,5 % бишофита в аглошихте была осуществлена в рамках проведения профилактических работ против смерзаемости руды, что улучшило механические свойства агломерата (на 1 % по барабанной прочности) и повысило на 0,2 % содержания магнезии в нем.

Исследованиями влияния на процесс агломерации железорудного сырья добавок карналлита Соликамского месторождения установлено, что, при оптимальном его расходе, прочность агломерата по ГОСТ 15137 по показателю X<sub>1</sub> повышается на 2,0 %, а показатель истираемости снижается на 0,7 – 1,0 %. В

агломерате на четверть снижается массовая доля цинка, степень удаления серы повышается на 30 %.

Таблица 1

Влияние магнийсодержащих добавок на показатели качества агломерата

Вид добавки, условия	Расход добавок, %	Выход годного, %	Прочность, %	Истираемость, %	RDI+3,15
<b>Базовая шихта</b>					
Лабораторные	–	74,0	60,5	7,0	56,8
Производственные	–	н.опр.	<b>59,5÷60,9</b>	6,7	57,8
<b>Шихта с добавкой сырого сидерита</b>					
Лабораторные	10	76,1	58,9	6,8	57,4
Производственные	9,6	н.опр.	<b>60,9</b>	6,9	59,3
<b>Шихта с добавкой дунита</b>					
Лабораторные	0,5	76,8	61,2	6,9	63,0
	0,8	77,5	62,7	6,9	66,5
	1	78,6	64,0	6,7	68,0
	2	77,9	63,0	6,8	74,0
	4	73,2	60,0	7,1	60,9
	6	72,0	59,5	7,3	н.опр.
Производственные	1,5	н.опр.	<b>61,1÷62,6</b>	6,7	74,1
	4,3	н.опр.	<b>58,6÷60,0</b>	7,1	59,1
<b>Шихта с добавкой бишофита</b>					
Лабораторные	1	75,5	62,3	6,9	н.опр.
	2	76,1	62,3	6,9	59,8
	4	73,5	60,2	7,1	н.опр.
Производственные	0,5	н.опр.	<b>61,5</b>	6,7	н.опр.
<b>Шихта с добавкой стронцийсодержащего доломита</b>					
Лабораторные	1	75,7	61,0	7,0	н.опр.
	2	77,4	62,3	7,0	60,5
	3	76,5	61,7	7,0	57,9
Производственные	3,5	н.опр.	<b>60,4</b>	6,6	57,7
<b>Шихта с добавкой доломита</b>					
Лабораторные	2,4	76,1	62,4	6,9	56,9
<b>Шихта с добавкой карналлита</b>					
Лабораторные	1	74,8	61,7	6,9	н.опр.
	2	75,1	62,0	6,9	58,7
	3	75,5	60,8	7,0	н.опр.
	5	73,6	59,8	7,2	н.опр.

Результаты предварительных исследований (табл. 1) и наличие вблизи Нижнего Тагила Соловьевогорского месторождения предопределило проведение расширенных испытаний по введению в шихту дунита<sup>1</sup>.

Дуниты состоят из оливина (97 – 99,5 %) и в ряду форстерит – фаялит занимают положение, отвечающее содержанию форстерита 83 – 87 %.

<sup>1</sup> Данный этап работы проводился под руководством проф. Е. Ф. Вегмана

Химический состав дунитов по данным 130 анализов представлен в табл. 2. Дунит не содержит вредных для черной металлургии примесей (S, P, Zn), содержание щелочей ( $K_2O+Na_2O$ ) на уровне следовых величин (0,01 – 0,03 %).

Таблица 2

Химический состав нижнетагильских дунитов и аподунитовых серпентинитов

Данные анализов, %	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	п.п.п.
Диапазон изменения	32 – 42	38 – 49	0,2 – 0,9	0,2 – 0,3	0,1 – 7	3 – 7	1 – 18
Средневзвешенные	35,18	42,52	0,71	0,22	1,97	5,93	12,61

Расход дунита в лабораторных спеканиях составлял от 0,5 до 2 %. В результате проведенных исследований установлено, что ввод в шихту дунита в указанных количествах повышает производительность установки и холодную прочность агломерата. Восстановимость агломератов изменилась незначительно. Температурный интервал размягчения и, особенно, «горячая» прочность (рис.3) при реальных расходах топлива (от 40 до 60 кг/т агломерата) резко улучшаются по мере увеличения содержания дунита в аглошихте от 0 до 2 %.

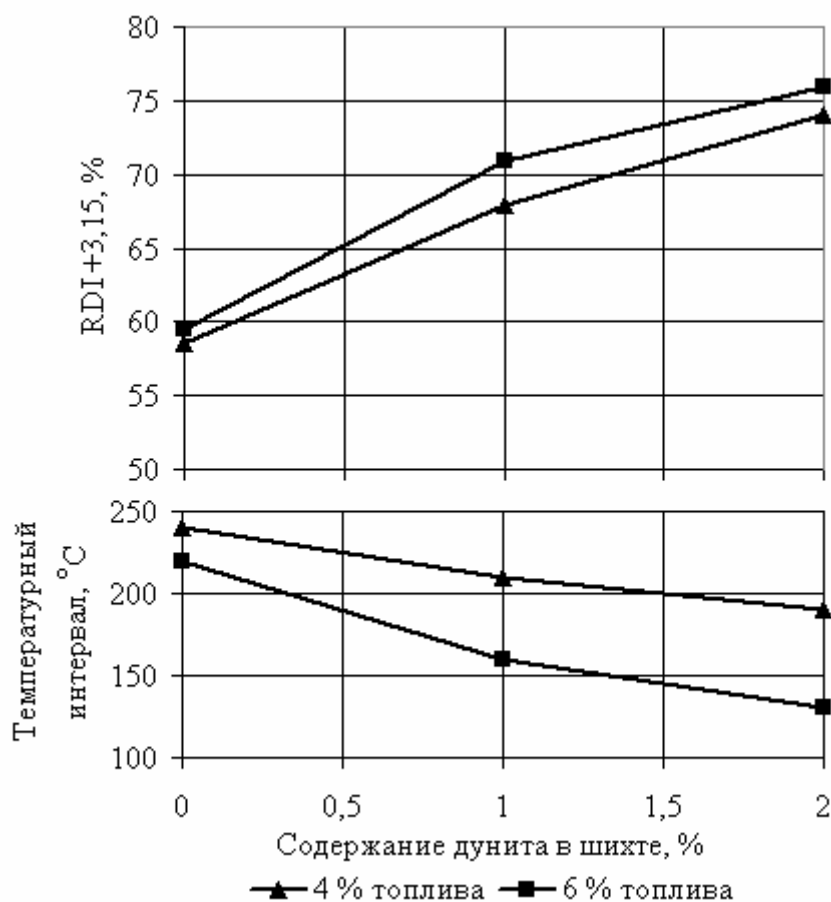


Рис. 3. Влияние расхода дунита в шихту на температурный интервал размягчения и горячую прочность агломерата

Зависимости показателей аглопроцесса от количества добавляемого в шихту дунита носят экстремальный характер. Для подтверждения этих выводов были проведены дополнительные спекания с увеличенным расходом дунита в шихту. По каждой группе спеканий (с различным расходом топлива) были выведены зависимости прочности агломерата от доли дунита в шихте. Дифференцирование этих уравнений с последующим определением точек экстремума позволило выявить зависимость оптимального расхода дунита от расхода топлива для получения максимальной прочности (рис. 4).



Рис. 4. Зависимость оптимального расхода дунита от расхода топлива

На основании результатов лабораторных исследований было организовано опытно-промышленное производство агломерата с введением в шихту дунита. Расход дунита в шихту задавался из расчета получения в доменных шлаках 6 % MgO и составлял 1 – 1,5 %.

При проплавке опытного агломерата производительность доменной печи увеличилась на 1,7 %, расхода кокса снизился на 14,1 кг/т чугуна, уменьшился вынос колошниковой пыли и потери чугуна со шлаком на 2,5 и 0,9 кг/т чугуна. Коэффициент распределения серы между шлаком и чугуном возрос с 36,3 до 42,0, концентрация серы в чугуне снизилась с 0,019 до 0,015 %.

По среднесуточным анализам шлака был выведен ряд зависимостей, позволивший уточнить оптимальное содержание магнезии в шлаке –  $7 \pm 0,2$  %. Одна из этих характерных зависимостей показана на рис. 5.

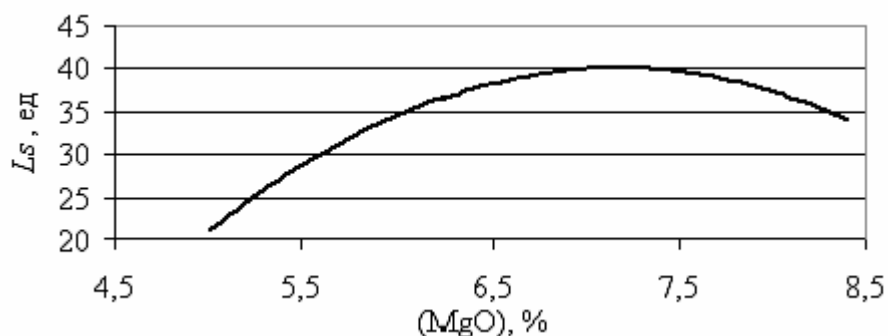


Рис. 5. Зависимость  $L_s$  от содержания MgO в шлаке

Эффективность использования дунита дополнительно подтверждается лабораторными исследованиями фильтруемости расплава предварительно восстановленных агломератов через коксовую насадку. Результаты исследования показали (табл. 3), что агломерат, полученный из шихты с дунитом, имеет более высокую фильтруемость. Показатели фильтруемости данного агломерата по сравнению с агломератом, полученным из шихты с добавкой сидерита, более высокие, что обеспечивает повышение производительности доменной печи. Эти исследования были подтверждены результатами доменных плавов в 2006 г.

Таблица 3

Оценка фильтрации продуктов плавления агломератов ОАО «ВГОК» через коксовую насадку

Наименование показателя	Агломераты с добавками		
	сидерита	дунита	доломита
Количество продуктов плавки, гр.			
Общее	1215	1246	1247
Профильтровавшееся	1129	1191	1185
Зависшее в коксовой насадке	86	55	62
Фильтруемость, %			
Продуктов всего	92,92	95,59	95,03
Шлака	73,95	84,24	82,29
Продолжительность процесса, мин	100	68	60

На основании проведенных исследований разработана технология производства железорудного агломерата с использованием в шихте дунита для улучшения шлакового режима доменной плавки.

**В четвертой главе** приведены результаты сквозных исследований направленных на повышение эффективности переработки титаномагнетитов.

Согласно уравнению А. Эйнштейна кажущаяся вязкость гетерогенного шлакового расплава может быть уменьшена либо снижением истинной вязкости жидкости, либо сокращением доли твердых фаз в шлаковой системе:

$$\eta = \eta_0((1 + 2,5\varphi) + 7\varphi^2 + \dots).$$

Снижение истинной вязкости может быть достигнуто применением шлакоразжижающих добавок. Одной из таких добавок является борный ангидрид –  $B_2O_3$ .

Разработка технологии использования борсодержащих добавок при проплавке титаномagnetитов началась с применения боратовой руды (флюса) Индерского месторождения (Республика Казахстан)<sup>2</sup>.

Были проведены лабораторные исследования по определению влияния добавки боратowego флюса в агломерационную шихту Качканарского ГОКа на показатели процесса агломерации. Установлено, что при введении боратowego флюса повышается прочность агломерата, но снижается на 0,3 – 0,5 % содержание железа в агломерате. В ходе спеканий определено, что от 10 до 15 % оксида бора улетучивается.

Другая возможность снижения вязкости шлаков при плавке качканарского сырья связана с производством борсодержащего агломерата на обычной шихте Лебяжинской аглофабрики с целью последующего использования его в качестве добавки при плавке титаномagnetитов. Принципиальная возможность производства такого агломерата была выявлена лабораторными спеканиями, в результате которых определено, что при добавке 3 – 5 % боратowego флюса к обычной плановой шихте Лебяжинской аглофабрики около 25 % бора улетучивается с технологическими газами, в агломерате снижается массовая доля железа на ~ 0,4 %, производительность установки не изменяется, прочностные характеристики агломерата незначительно улучшаются, расход твердого топлива снижается на 3 – 4 кг/т агломерата.

Проведено два промышленных эксперимента (продолжительностью: первый – 20 суток на одной печи, второй – один месяц на трех печах) с использованием в шихте доменных печей, выплавляющих ванадиевый чугун, 5 % агломерата с

---

<sup>2</sup> Работа проводилась по инициативе д.т.н. Акбердина А.А.

содержанием  $B_2O_3 - 0,4 - 0,44 \%$ . Это позволило достичь снижения расхода кокса на  $3 - 6$  кг/т чугуна, повысить коэффициент извлечения ванадия до  $5 \%$ , снизить потери металла со шлаком в  $2 - 4$  раза. Отмечено также улучшение хода печи и качества чугуна по содержанию серы.

Промышленные испытания показали эффективность применения борсодержащих добавок в доменной плавке титаномagnetитов. При этом была определена достаточность содержания оксида бора в доменных шлаках, обеспечивающих отношение  $B_2O_3/TiO_2$  на уровне  $0,01$ . Применение данной технологии ограничено из-за высокой цены концентрата и большого количества улетучивающегося бора.

Проведены лабораторные исследования по возможности привлечения отходов от производства борсодержащего стекла в агломерационную шихту Качканарского ГОКа на показатели процесса агломерации. В исследованиях использовались отходы производства ПО «Стекловолокно» (г. Полоцк), следующего химического состава (%):  $10,5 B_2O_3$ ;  $16,5 CaO$ ;  $49,2 SiO_2$ ;  $4,6 MgO$ ;  $13,5 Al_2O_3$ ; п.п.п. и S – следы. Ежегодное образование отходов алюмоборосиликатного волокна по отрасли значительно превышает потребности доменного ванадиевого передела России (НТМК и Чусовской металлургический завод). Исследования проводились в лабораторных условиях при добавках стекла  $0,5$  и  $1,0 \%$ , что обеспечивает в шлаке требуемое соотношение оксида бора к двуокиси титана.

Характеристики полученных агломератов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики агломератов

Показатели	Расход стекловолокна в шихту, %		
	0	0,5	1,0
Содержание в агломерате, % $B_2O_3$	Сл.	0,06	0,1
$FeO$	16,8	13,8	11,7
S	0,03	0,02	0,02
Прочность по ГОСТ 15137, %: $X_1$ $X_2$	64,2	68,9	66,8
	7,4	5,7	4,6
Пористость, %	33,02	29,2	35,72
Восстановимость, %	72,1	71,0	79,9
Температура начала размягчения, °C	970	1025	990

Данные по результатам спеканий показывают, что добавки борсодержащего стекла в таких небольших количествах увеличивают прочность агломерата по ГОСТ 15137 по показателю  $X_1$  на 4,7 и 2,6 % при наличии в шихте 0,5 и 1 % стекловолокна, соответственно, а показатель истираемости снижается по мере увеличения расхода добавки на 2,7 %.

В результате данного этапа исследований установлено, что наиболее рационально использовать в качестве борсодержащей добавки к титаномagnetитовой агломерационной шихте отходов алюмоборосиликатного волокна в количестве до 1 %. Это позволяет повысить эффективность сквозной переработки при одновременном улучшении качества продуктов и снизить суммарные энергозатраты на 200 кДж/т чугуна.

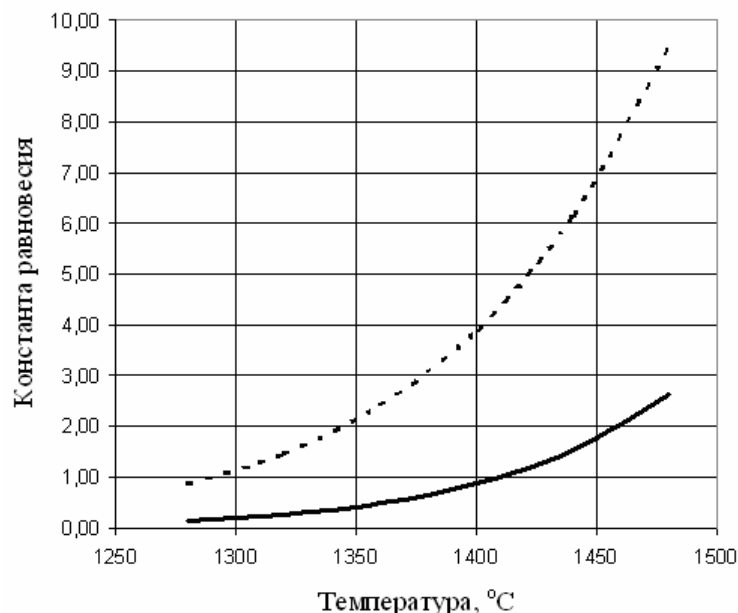
Вместе с тем, борсодержащие добавки кардинально не решают проблему подавления карбидообразования в доменной плавке титаномagnetитов.

Основным способом повышения технико-экономических показателей доменной плавки титаномagnetитов является разработка и внедрение мероприятий по подавлению образования карбидов титана и созданию условий для их разрушения в шлаковой системе. Для этого, прежде всего, необходим контроль процесса карбидообразования.

Предложено контролировать процессы карбидообразования по невязке баланса титана. Установлено, что невязка баланса связана с содержанием кремния в чугуне. В условиях плавки качканарского сырья на Серовском метзаводе, где получение низкокремнистых чугунов на доменных печах затруднительно, это проявилось особенно отчетливо.

Разрушение карбидов титана возможно при взаимодействии с закисью марганца. Сопоставление констант равновесия реакций:  $TiO + C = TiC + CO$ ,  $TiO + C = Ti + CO$ ,  $TiO_2 + Mn = Ti + Mn$ ,  $2MnO + TiC_{TB} = 2Mn + TiO + CO$ ,  $2FeO + TiC_{TB} = 2Fe + TiO + CO$ ; показало, что титан в чугун восстанавливается преимущественно с образованием  $TiC$ , а наличие  $MnO$  и  $FeO$  в шлаке способствует разрушению карбидов. Представленные на рис. 6 зависимости констант равновесия реакции взаимодействия  $MnO$  с углеродом и карбидом титана показывают преобладающее взаимодействие  $MnO$  с  $TiC$ .





..... константа равновесия реакции  $2\text{MnO} + \text{TiC} = 2\text{Mn} + \text{TiO} + \text{CO}$   
 — константа равновесия реакции  $\text{MnO} + \text{C} = \text{Mn} + \text{CO}$

Рис. 6. Зависимость константы равновесия восстановления марганца от температуры

Требуемый, для разрушения карбидов титана, расход марганцевой добавки определяется по уравнению:

$$M_{\text{шл}} = 1,48 \cdot (\text{Ti}_{\text{TiO}_2}^{\text{III}} - [\text{Ti}] - \text{Ti}_{(\text{TiO})} \times \text{Ш}) / K(0,01(\text{MnO})),$$

где  $\text{Ti}_{\text{TiO}_2}^{\text{III}}$  – приход титана с шихтой, кг Ti/т чугуна;  $[\text{Ti}]$  – содержание титана в чугуне, кг Ti/т чугуна;  $\text{Ti}_{(\text{TiO})}$  – содержание титана в шлаке, кг Ti/т чугуна; Ш – удельный выход шлака, т/т чугуна; (MnO) – содержание оксида марганца в добавке, %; K – эмпирический коэффициент.

Предложены и запатентованы способы подавления карбидообразования титана путем введения в шихту марганцевых добавок. Эффективность метода подтверждается результатами работы доменной печи (табл. 5 и рис. 7).

Таблица 5

Эффективность использования марганцевых добавок

Показатель	Базовые плавки	Опытные плавки		
Содержание в чугуне [Si], %	0,45	0,45	0,55	0,65
Содержание в чугуне [S], %	0,035	0,028	0,025	0,019
Расход добавки с содержанием MnO 15,5%	0	50	51	65
Удельный расход железа, кг/т чугуна	<b>1057</b>	<b>1008</b>	<b>1015</b>	<b>1024</b>
Потери чугуна, %	<b>11,8</b>	<b>7,23</b>	<b>7,5</b>	<b>8,35</b>

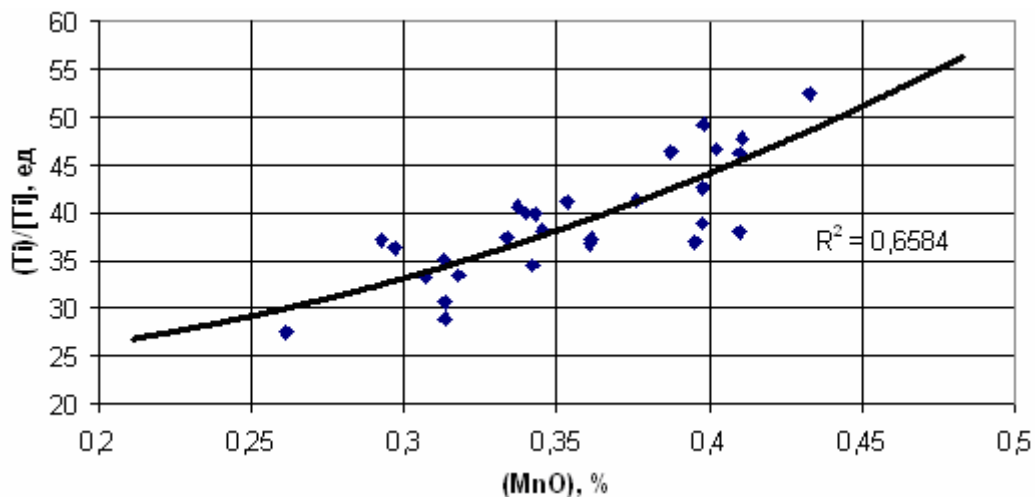


Рис. 7. Влияние (MnO) на распределение титана между шлаком и чугуном

Эффективность действия MnO на предотвращение карбидообразования титана может быть повышена путем снижения вязкости шлака. Но снизить вязкость шлака путем повышения его температуры в условиях доменной плавки титаномagnetитов можно только до определенного предела, поскольку это усиливает процессы карбидообразования. Таким образом, снизить вязкость шлака и повысить эффективность действия MnO на предотвращение карбидообразования титана возможно путем дополнительного ввода в шихту разжижающих добавок, например, борсодержащих.

В условия НТМК, где плавка титаномagnetитов традиционно велась с низким содержанием кремния в чугуне, после реконструкции появились условия выплавки чугуна с давлением дутья на фурмах до 0,5 МПа, что обеспечивается использованием бесконусного засыпного аппарата. Повышение давления препятствует восстановлению кремния и титана, так как эти реакции протекают с увеличением объема газов. Анализ производственных данных подтвердил одинаковое влияние теплового состояния на условия восстановления кремния и титана. Полученные зависимости позволили разработать способ доменной плавки, согласно которому минимизация восстановления титана достигается за счет снижения содержания кремния в чугуне до минимально возможного уровня, который определяется по обратной зависимости от максимально возможного давления в горне печи ( $p$ ):

$$[Si] = \frac{A}{p^B},$$

где  $A$ ,  $B$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от условий плавки.

Способ проверен на доменных печах ОАО «НТМК», имеющих разные объемы и разное давление в горне (табл. 6).

Таблица 6

Основные технологические параметры ванадиевых плавов

Показатели	Объем печи, м <sup>3</sup>			
	1513	1242	2200	2200
Давление дутья, ата	3,1 ÷ 3,2	3,45 ÷ 3,55	4,0 ÷ 4,15	4,8 ÷ 4,85
[Si], %	0,12 ÷ 0,13	0,1 ÷ 0,11	0,08	0,065 ÷ 0,07
Удельный расход железа, кг/т чугуна	1007	1000	998	997
Расход кокса, кг/т чугуна	455 ÷ 465	445 ÷ 450	410 ÷ 420	400 ÷ 415
Производительность удельная, т/м <sup>3</sup> ·сут	1,85 ÷ 1,9	2,2 ÷ 2,3	2,3 ÷ 2,4	2,45 ÷ 2,5

При освоении технологии доменной плавки на реконструированных доменных печах были отмечены следующие негативные моменты:

- повышенные колебания основности шлака, как в период выпуска, так и между выпусками;
- повышение содержания серы в чугуне.

Выполненные исследования показали, что многокомпонентность шихты и порядок (система) ее загрузки во многом определяют стабильность химического состава продуктов плавки. Это связано с явлением опережения одних материалов другими по мере опускания столба шихты и локальным размещением на колошнике известняка и добавок. Наличие бесконусных засыпных устройств лоткового типа и конвейерной системы нижней загрузки на печах НТМК, выплавляющих ванадиевый чугун, вносит определенные особенности в возможности получения чугуна и шлака постоянного качества. Разработан и запатентован метод снижения колебаний химического состава продуктов плавки, заключающийся в предварительном смешивании компонентов шихты перед загрузкой их в доменную печь.

Снижение доли некондиционного по сере чугуна достигается и за счет выбора оптимальной основности шлака. Статистический анализ результатов плавки показал (рис. 8), что стабильная работа достигается при содержании кремния 0,05 – 0,12 % и основности шлака 1,20 – 1,25.

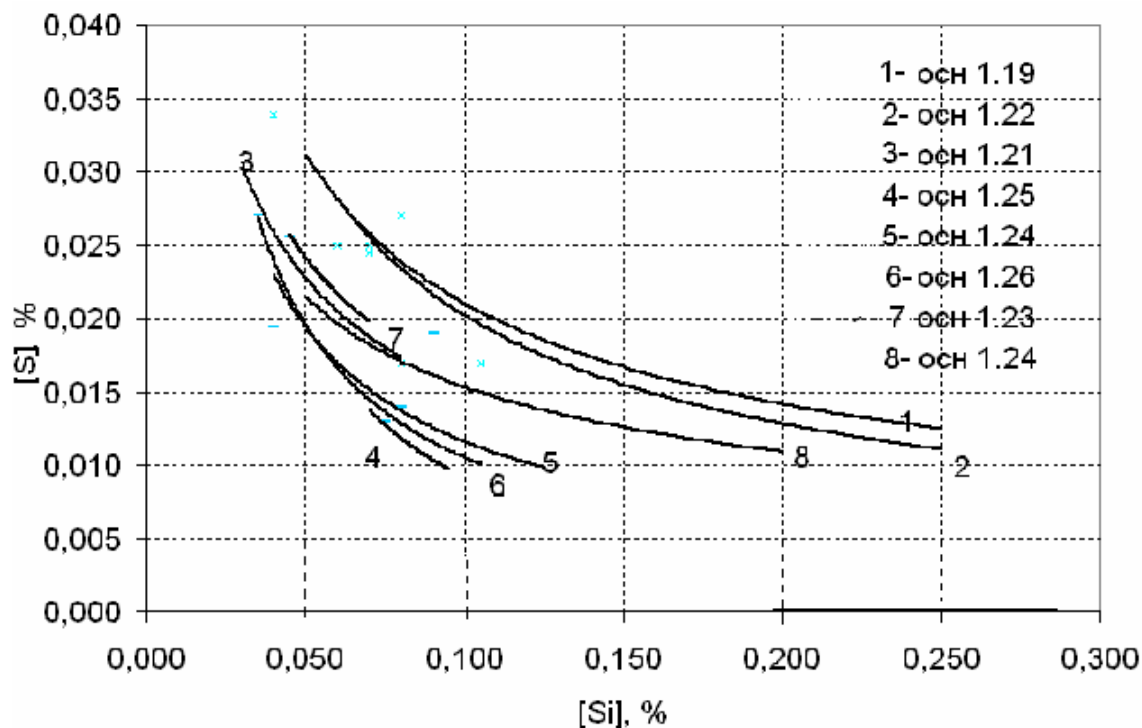


Рис. 8. Влияние на [S] основности шлака и [Si]

На основании выполненных работ разработаны и согласованы изменения в технологической инструкции по выплавке ванадиевого чугуна на доменных печах №№ 5 и 6 (табл. 7).

Таблица 7

Оптимальные параметры технологического режима работы доменных печей при выплавке ванадиевого чугуна

Наименование параметра	Значения		
	Существовавшие	Разработанные и рекомендованные	Согласованные и измененные
Теоретическая температура горения, °C	1950 - 2100	1900 - 1950	1850-2000
Основность шлака (CaO/SiO <sub>2</sub> )	1,1 – 1,2	1,20 – 1,25	1,15-1,25
Содержание в чугуне, %: Si	0,1 – 0,3	0,05 – 0,12	0,05-0,15
Расход марганцевой добавки	-	+	+
Температура чугуна на выпуске, °C	1450 ± 20	1430	1430 ± 20

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация содержит результаты теоретических, экспериментальных и прикладных исследований, направленных на совершенствование технологии доменной плавки. Разработанные технологические решения, в основном, запатентованы, прошли промышленное опробование и внедрены в производство. Наиболее значимые результаты и выводы:

1. Определен оптимальный уровень содержания MgO в конечных шлаках применительно к выплавке передельного чугуна в доменном производстве

НТМК и разработаны технологически и экономически оправданные режимы производства агломерата и выплавки чугуна из руд Тагило-Кушвинского месторождения.

2. Экспериментально изучено влияние на показатели процесса спекания и качество агломерата различных магнийсодержащих добавок к аглошихте, что позволило рекомендовать дунит для улучшения шлакового режима доменной плавки. Промышленное использование данного мероприятия привело к снижению потерь чугуна со шлаком.

3. Исследовано влияние ввода борсодержащего агломерата в шихту доменной плавки титаномagnetитов. Промышленное опробование данной технологии показало, что в результате снижения вязкости шлака снижаются потери чугуна. Данное мероприятие следует считать перспективным при увеличении концентрации титана в рудном сырье.

4. Разработаны практические мероприятия и технологические приемы по подавлению образования карбидов титана, в т.ч. путем использования в доменной шихте монооксида марганца. Данные способы защищены 3-мя патентами и были опробованы в промышленных масштабах. Добавка в шихту марганецсодержащих материалов используется в технологии выплавки ванадиевого чугуна на НТМК.

5. Получены зависимости, определяющие необходимый расход борсодержащих и марганецсодержащих добавок при плавке титаномagnetитов. Показана перспективность их совместного использования.

6. Установлено, что изменить поведение титана в доменном процессе и улучшить свойства образующихся расплавов при восстановлении и плавке титаномagnetитов можно путем учета взаимосвязи содержания кремния в чугуне с давлением в горне доменной печи и основностью шлака.

7. Разработаны и включены в технологическую инструкцию рекомендации по выплавке ванадиевого чугуна на реконструированных доменных печах НТМК.

**Основное содержание диссертационной работы отражено в следующих публикациях:**

1. Тлеугабулов Б.С., Вегман Е.Ф., Марсуверский Б.А. Повышение металлургических свойств агломерата введением в аглошихту магниальных добавок. Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы повышения качества металлопродукции по основным переделам черной металлургии», Днепропетровск, 1989.

2. Тлеугабулов Б. С., Кобелев В. А., Чернавин А. Ю. Применение стронцийсодержащего доломита в аглодоменном производстве. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Интенсификация металлургических процессов и повышение качества металлов и сплавов» (19-21 марта 1990г.), Тула, 1990 г.

3. Тлеугабулов Б. С. Влияние магнийсодержащих добавок на технико-экономические показатели аглодоменного производства. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Интенсификация металлургических процессов и повышение качества металлов и сплавов» (19-21 марта 1990г.), Тула, 1990 г.

4. Тлеугабулов Б.С., Марсуверский Б.А., Бутивченко В.Н. Экологические аспекты при применении магниальных добавок в аглошихте. Тезисы докладов всесоюзной научно-технической конференции «Проблемы теории и технологии подготовки железорудного сырья для доменного процесса и бескоксовой металлургии», Днепропетровск, 1990 г.

5. Тлеугабулов Б.С., Марсуверский Б.А., Чернавин А. Ю. Влияние массовой доли железа в шихте на технико-экономические показатели доменной ванадиевой плавки. Тезисы докладов шестого всесоюзного совещания по химии, технологии и применению ванадиевых соединений, Н. Тагил – Свердловск, 1990г. С. 19.

6. Тлеугабулов Б.С., Николаев Ф.П. Оптимизация шлакового режима передельной плавки. Материалы региональной научно-технической конференции «Наука – Образование – Производство»: Опыт и перспективы развития». Нижний Тагил : НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2009. С. 165-166.

7. Тлеугабулов Б.С. К вопросу о загрузочных устройствах агломерационных машин. Сталь. 2007. № 3. С. 4-8.

8. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю., Волков Д.Н., Тлеугабулов Б.С. Проблемы получения качественного чугуна из руд Северопесчанского месторождения. Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Уральская металлургия на рубеже тысячелетий», Челябинск, Изд. ЮУрГУ, 1999 г. С. 25-26.

9. Загайнов С.А., Онорин О.П., Гилева Л.Ю., Волков Д.Н., Тлеугабулов Б.С. Разработка и внедрение математического и программного обеспечения для гибких технологических режимов работы доменных печей. Сталь. 2000. № 9. С. 12-15.

10. Тлеугабулов Б.С. Использование бишофита и карналлита при агломерации железорудного сырья. Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 12. С. 62-63.

11. Тлеугабулов Б.С. Применение борсодержащих добавок в агломерации и доменной плавке титаномагнетитов. Вестник УГТУ-УПИ. 2006. № 4(75) С. 120-124.

12. Кушнарев А.В., Киричков А.А., Филиппов В.В., Михалёв В.А., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С. Внедрение инновационных решений для совершенствования технологии выплавки ванадиевого чугуна на НТМК. Сборник тезисов докладов I международной научно-практической конференции «ИНТЕХМЕТ-2008» - СПб, 2008. С. 76-77.

13. Пыхтеева К. Б., Загайнов С.А., Тлеугабулов Б.С., Филиппов В. В., Николаев Ф. П., Белов В. В. Стабилизация состава продуктов доменной плавки титаномагнетитов при загрузке шихты БЗУ лоткового типа. Сталь. 2009. № 1. С. 16-19.

14. Загайнов С.А., Ситников В.А., Филатов С.В., Тлеугабулов Б.С., Пыхтеева К.Б. Исследование особенности формирования столба шихтовых материалов при использовании бесконусного загрузочного устройства. Творческое наследие Б.И. Китаева: труды Междунар. науч.-практ. конф. 11 – 14 февраля 2009 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. С. 252- 255.

15. Загайнов С.А., Шаврин С.В., Онорин О.П., Тлеугабулов Б.С., Журавлев Д.Л., Филиппов В.В. Анализ работы доменной печи № 6 НТМК и разработка рекомендаций по совершенствованию технологии выплавки ванадиевого чугуна. Бюллетень Черметинформация «Черная металлургия». 2007. № 2. с. 92.

16. Загайнов С.А., Онорин О.П., Тлеугабулов Б.С., Собянина О. Н., Пыхтеева К.Б. Исследование работы агрегатов и систем доменной печи № 5 и разработка технологии производства ванадиевого чугуна. Бюллетень Черметинформация «Черная металлургия». 2008. № 7. с. 70.

17. Загайнов С.А., Онорин О.П., Тлеугабулов Б.С., Собянина О. Н., Пыхтеева К.Б. Разработка и выдача рекомендаций по стабилизации состава продуктов плавки при выплавке ванадиевого чугуна. Бюллетень Черметинформация «Черная металлургия». 2008. № 7. с. 70.

18. А.с. СССР № 1049546. Способ доменной плавки /Тлеугабулов С.М., Тлеугабулов Б.С. //Бюл. № 39. 1983.

19. Пат. РФ № 2034031. Способ доменной плавки титано-магнетитов /Качула Б.В., Кобелев В.А., Шатлов В.А., Марсуверский Б.А., Чернавин А.Ю., Тлеугабулов Б.С., Матвеев В.В., Филиппов В.В., Филатов С.В., Рудин В.С., Зорин С.Р., Шибает Г.С., Верховцев Г.П. //Бюл. №12. 1995.

20. Пат. РФ № 2139947. Способ переработки медных концентратов /Баков А.А., Волков Д.Н., Тлеугабулов Б.С. //Бюл. №29. 1999.

21. Пат. РФ №2160317. Шихта для производства агломерата /Абаимов Ю.И., Баков А.А., Волков Д.Н., Кобелев В.А., Сергиенко И.А., Тлеугабулов Б.С. //Бюл. №34. 2000.

22. Пат. РФ № 2159288. Способ доменной плавки титаносодержащего железорудного сырья /Баков А.А., Баков А.В., Волков Д.Н., Гилева Л.Ю., Загайнов С.А., Крамаренко Н.Г., Лобыч А.М., Онорин О.П., Сергиенко И.А., Тлеугабулов Б.С. //Бюл. №32. 2000.

23. Пат. РФ на полезную модель № 69068. Комплекс для выплавки чугуна из титаносодержащих агломерата и окатышей разной основности /Журавлев Д.Л., Загайнов С.А., Кушнарев А.В., Леонов В.Ю., Николаев Ф. П., Нуриев Р.И., Онорин О.П., Тлеугабулов Б.С., Филиппов В.В., Юрьев А.Б. //Бюл. №34. 2007.

24. Пат. РФ № 2351657. Способ доменной плавки титаносодержащего железорудного сырья. /Кушнарев А.В., Юрьев А.Б., Шаврин С.В., Загайнов С.А., Киричков А.А., Тлеугабулов Б.С., Филиппов В.В., Журавлев Д.Л., Николаев Ф. П., Рыбаков Б.П. //Бюл. № 10. 2009.